

УДК 537.84

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА МГД-СТАБИЛЬНОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Савенкова Н.П.<sup>1</sup>, Анпилов С.В.<sup>1</sup>, Калмыков А.В.<sup>1</sup>, Пискажова Т.В.<sup>2</sup>, Проворова О.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова. Факультет  
ВМК*

<sup>2</sup> *Сибирский федеральный университет*

<sup>3</sup> *Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова. Физический  
факультет*

## Введение

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости МГД-стабильности алюминиевого электролизёра от управляющих параметров. Под МГД-стабильностью понимают квазиустойчивое состояние границы раздела сред расплавленного алюминия и электролита в электролизной ванне. Если амплитуда границы раздела сред хотя бы в одной точке достигает зоны обратного окисления металла, то считается, что МГД-стабильность ванны нарушена.

Для исследования влияния управляющих параметров (таких как напряжённость электромагнитного поля и силы тока) на МГД-стабильность алюминиевого электролизера использована разработанная ранее авторами математическая модель [3, 4]. Процесс электролиза алюминия протекает в агрессивной щелочной среде при температуре порядка 960С<sup>0</sup>, силе тока 250 кА. Выгорающие аноды требуют замены, при которой, может произойти нарушение устойчивого режима работы электролизёра, что приводит к потерям выхода алюминия. Однако управление процессом при помощи АСУТП, которое заключается в варьировании управляющих параметров, позволяет стабилизировать процесс электролиза.

## Математическая модель

Разработанная ранее [3, 4] математическая модель основана на двухкомпонентном описании смеси двух вязких жидкостей – алюминия и криолита. За основу модели берется система уравнений Навье-Стокса для описания процессов течения многокомпонентной жидкости [2] и трехмерная система уравнений Максвелла для расчета токов и электромагнитных полей. Разработанная трехмерная модель позволяет работать в реальной геометрии - учитывать геометрическое распределение анодов, форму рабочего пространства электролизной ванны.

Полученная система уравнений в частных производных решается методом конечных разностей [1]. Расчётная область покрывается регулярной трёхмерной сеткой по пространству, по временной координате вводится неравномерная сетка. В основе предлагаемого численного метода находится метод разделения по физическим процессам. Для уравнений неразрывности и импульса используется разностная схема второго порядка точности по пространству и времени, способ решения подробно описан в работах [3, 4].

## Результаты расчётов.

Ниже приводятся результаты численных экспериментов, демонстрирующие влияние управляющих параметров процесса электролиза алюминия на МГД стабильность ванны. Математическое моделирование проводилось для конкретной промышленной ванны с 22 обожжёнными анодами.

На рис. 1 изображены зависимость максимальной высоты металла от времени при стабильной работе электролизёра и характерная форма границы раздела металл-электролит, полученные в результате расчёта. Были использованы следующие значения управляющих параметров, соответствующие стабильной работе электролизёра: 250 кА, максимальное значение  $x$ -компоненты вектора магнитного поля - 10 тыс. А/м,  $y$ -компоненты – 5 тыс. А/м,  $z$ -компоненты – 4 тыс. А/м. Последующие эксперименты будем сравнивать с данным расчётом, значения управляющих параметров этого расчёта назовём фоновыми.

В данной серии расчётов полагается, что реакционная зона занимает верхнюю треть объёма ванны, т.е. её нижняя граница расположена на высоте 0.4 м. Как видно из рис. 1, при стабильной работе электролизёра межполюсное расстояние слабо изменяется со временем.

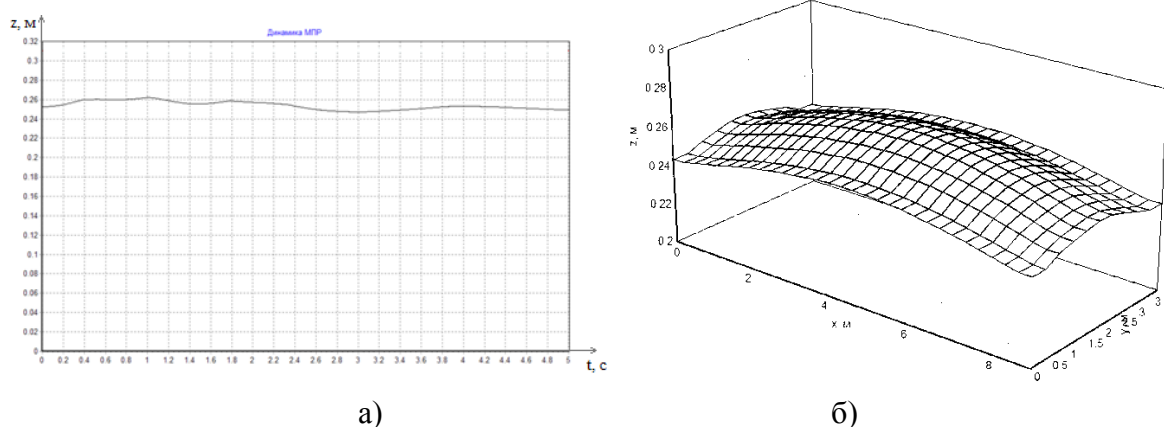


Рис. 1. а) График максимальной высоты уровня металла при фоновых параметрах;  
б) Соответствующая характерная форма границы раздела сред.

При замене выгоревших анодов происходит перераспределение подаваемого тока по оставшимся в ванне анодам. При этом величина вертикального тока, проходящего по анодам, увеличивается. Однако перераспределение тока по анодам не является равномерным. Поэтому представляет интерес численного исследование зависимости границы раздела сред от величины вертикального тока.

Численный эксперимент, приведённый ниже, проведён с целью исследования зависимости МГД-стабильности ванны в зависимости от величины вертикального тока, который подаётся на аноды. Оставив все величины прежними, увеличим силу тока подаваемую на аноды до 300 кА. На рис. 2 приведена зависимость МПР от времени и форма границы раздела сред при одном из наиболее сильных всплесков.

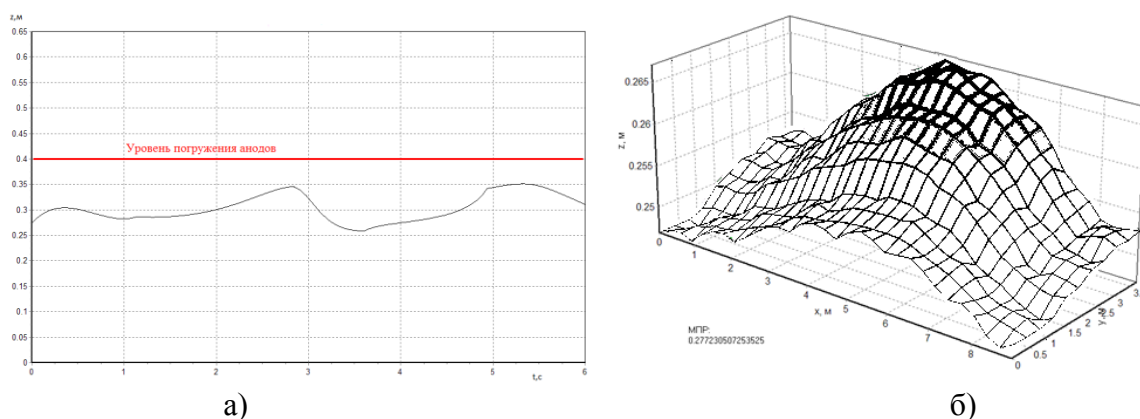


Рис. 2. а) Динамика макс. высоты металла при увеличенной силе тока до 300 кА;  
б) График границы раздела в момент всплеска при увеличенной силе тока.

Из численного расчёта видно, что при увеличении силы тока нарушается стабильная работа электролизёра. Увеличение силы тока эквивалентно уменьшению слоя электролита, что так же ведёт к нестабильной работе электролизёра.

Магнитные поля от соседних ванн, а так же поля, наведённые искусственно, могут сильно повлиять на поле внутри ванны. Численный эксперимент с измененной  $x$ -ой компонентой магнитного поля до значения 40 тыс. А/м в точке максимума показывает увеличение амплитуды МПР, на рис. 3 приведены соответствующие данному расчёту результаты.

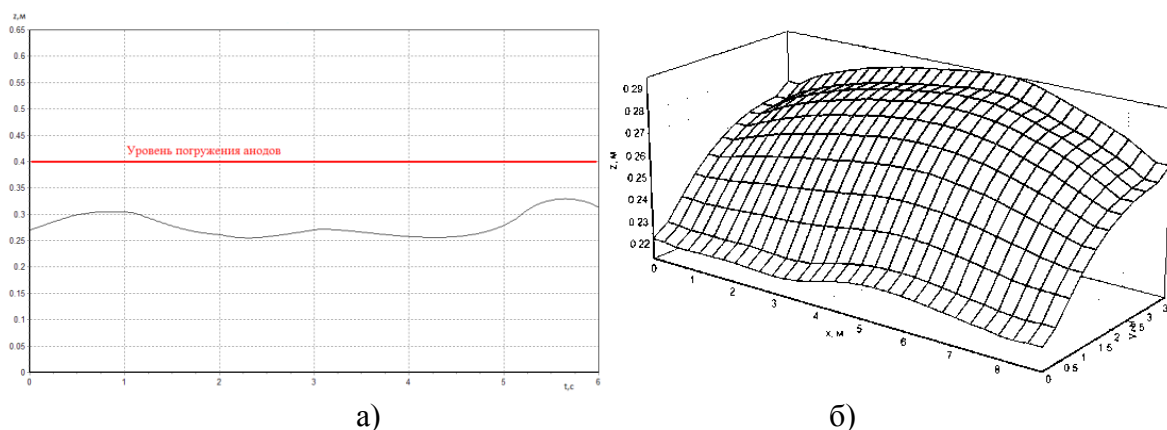


Рис. 3. а) Динамика макс. высоты металла при увеличенной  $x$ -компоненты магнитного поля; б) Соответствующее расчёту положение границы раздела.

Из расчёта видно, что изменение  $x$ -компоненты магнитного поля так же ведёт к нестабильной работе электролизёра. На рисунке 3.б можно увидеть, что поверхность раздела сред наклонилась в сторону оси  $OX$ .

На рис. 4 приведены результаты, полученные при численном эксперименте с измененной до значения 25 тыс. А/м  $y$ -компонентой магнитного поля.

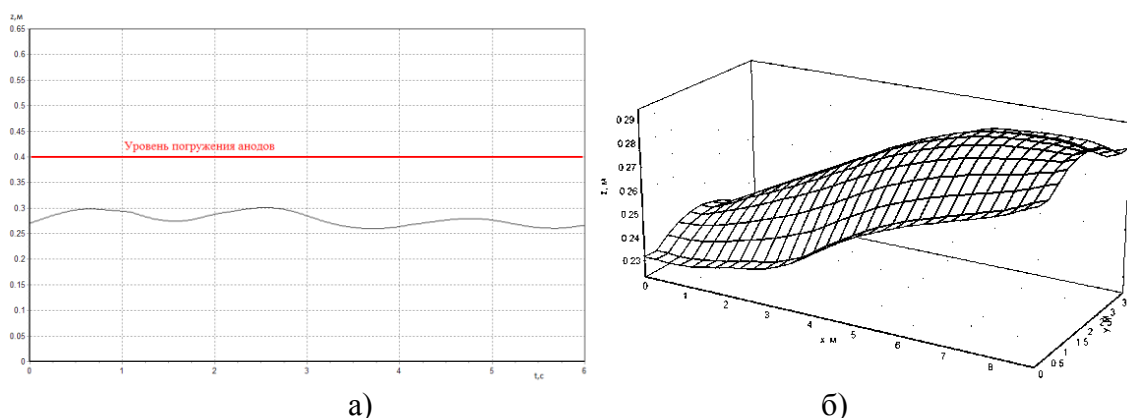


Рис. 3. а) Динамика макс. высоты металла при увеличенной  $y$ -компоненты магнитного поля; б) Соответствующее расчёту положение границы раздела.

Появление наклонов границы раздела сред относительно соответствующих осей в предыдущих расчётах обусловлено увеличением силы Лоренца. Как видно из графиков динамики МПР, изменение  $x$ -ой или  $y$ -ой компонент вектора магнитного поля ведёт к нарушению стабильной работы электролизёра.

Далее приводится расчет с увеличенной до значения 12 тыс. в точке максимума  $z$ -компонентой магнитного поля.

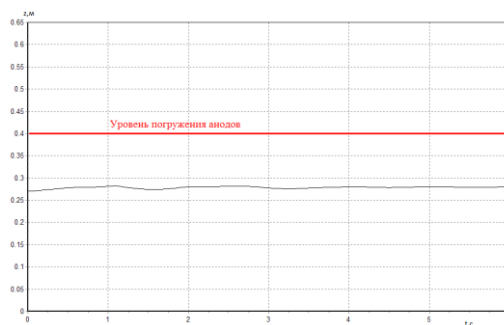


Рис. 4. Динамика макс. высоты подъема металла при увеличенной z-ой составляющей магнитного поля.

Из рисунка 4 видно, что Амплитуда колебаний МПР стала меньше, процесс проходит даже более стабильно, чем при фоновых параметрах.

### Заключение

Описанные выше результаты численных экспериментов демонстрируют зависимость динамики МПР от управляющих параметров. Численные расчёты подтвердили, что увеличение числового значения любого из управляющих параметров ведёт к нестабильной работе электролизёра. Основными причинами изменения управляющих параметров являются магнитные поля других ванн, анодный эффект, выемка выгоревших анодов. Зная зависимость работу электролизной ванны от управляющих параметров, можно сориентировать программу АСУТП таким образом, чтобы АСУТП заранее учитывало увеличение параметров и стабилизировало работу электролизной ванны.

### Литература

1. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. — М.: Наука, 1980.
2. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
3. Н. П. Савенкова, А. В. Шобухов, С. В. Антилов, Р. Н. Кузьмин «Математическое моделирование физико-технологического процесса электролиза» // Прикладная физика. 2009. №6. С.43-51
4. Савенкова Н.П., Антилов С.В., Кузьмин Р.Н., Проворова О.Г., Пискажова Т.В. «Двухфазная трёхмерная модель алюминиевого электролизёра» // Прикладная физика, 2011, №6. С.25-33.